

## **Mineralogía del yacimiento laterítico níquelífero San Felipe, Camagüey, Cuba**

Alfonso Chang-Rodríguez  
Esperanza Tauler-Ferre  
Joaquín A. Proenza-Fernández  
Arturo L. Rojas-Purón

### **Resumen**

El propósito de este estudio fue la caracterización mineralógica y cristaloquímica del perfil de intemperismo del yacimiento San Felipe (Camagüey, Cuba). En este trabajo se exponen resultados de difracción de rayos X (DRX), microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido con analizador de dispersión de energía (SEM-EDS) y microscopía electrónica de transmisión con analizador EDX acoplado. Las principales fases minerales portadoras de níquel son esmectitas, lizardita, cloritas, asbolanas, goethita y maghemita. Dentro del grupo de las esmectitas se identificó la nontronita como principal especie mineralógica portadora de la mineralización, representando alrededor del 65% en peso de las menas del horizonte; esta especie fue también caracterizada cristaloquímicamente. Estos resultados podrán ser utilizados para medir el grado de eficiencia industrial en la futura planta de beneficio de San Felipe.

**Palabras clave:** mineralogía; cristaloquímica; níquel; lateritas; yacimiento San Felipe; Cuba.

## **Nickel laterite ore mineralogy, San Felipe, Camagüey, Cuba**

### **Abstract**

The objective was to identify and characterize the mineral phases containing nickel in the San Felipe ore body located in Camaguey, Cuba. X-ray diffraction techniques, optical microscopy, scanning electron microscopy with energy dispersive analyzer and transmission electron microscopy with coupled EDX analyzer were used. It was determined that the main nickel bearing mineral phases in San Felipe were smectite, lizardite, chlorite, asbolite, goethite and maghemite. Within the group of smectites, the nontronite (ferric-magnesium smectite) accounts for approximately 65% in weight of the horizon ore bodies and it is the main mineralogical species containing nickel mineralization; it was also characterized from the crystal chemistry point of view. These results can be used to measure the industrial efficiency grade in the San Felipe future plant.

**Keywords:** mineralogy; crystallochemistry; nickel laterites; San Felipe ore body; Cuba.

## 1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de esta contribución es la identificación y caracterización mineralógica de las fases portadoras de níquel del yacimiento San Felipe; en particular, de la cristaloquímica de la nontronita, principal fase portadora de la mineralización niquelífera.

En función de la composición mineralógica en los depósitos lateríticos se distinguen tres grandes tipos: silicatos hidratados, arcillosos y oxidados (Brand, Butt & Elías 1998; Elías 2002; Gleeson, Butt & Elias 2003; Freyssinet, Butt & Morris 2005; Proenza 2015).

Los estudios mineralógicos detallados, con el objetivo de caracterizar las fases minerales portadoras de níquel en los yacimientos lateríticos, iniciaron principalmente a partir de los años 60 del siglo XX. Fueron Linchenat y Shirokova (1964); Kudelasek, Zamarsky y Marxova (1967); Shirokova (1967) y Strnad (1968) los primeros en exponer la necesidad del estudio de los minerales que portan níquel en Cuba, al valorar el estado de conocimiento de los portadores de Ni en las menas residuales cubanas.

La mayoría de los estudios se han dirigido a minerales oxidados y silicatados hidratados (Elías, Donaldson & Giorgetta 1981; Lewis *et al.* 2006; Tauler 2009), siendo los minerales arcillosos los menos estudiados. Se conoce que en los minerales oxidados el níquel está asociado predominantemente a la goethita y a los hidróxidos de manganeso y cobalto (Zeissink 1969; Roqué-Rosell *et al.* 2008, 2010; Proenza 2015).

Con relación a los minerales silicatados, los trabajos de Brindley (1978) indican que se trata de una mezcla de silicatos de magnesio-níquel hidratados (Villanova-de Benavent *et al.* 2014).

Resultados importantes sobre los portadores de níquel en las lateritas cubanas han sido obtenidos por Cordeiro, Collazo y Voskresenskaya (1977), Cordeiro (1981) y Voskresenskaya (1983, 1987). Ellas han trabajado intensamente utilizando métodos de disolución selectiva en lateritas y serpentinitas, estableciendo un método de análisis químico de fases (AQF), que permite determinar la forma de asociación y el contenido de níquel en las distintas macrofases presentes en las lateritas.

Un notable aporte al conocimiento de la mineralogía de las cortezas de intemperismo en la región de Moa lo constituyen los trabajos de Ponce y Carrillo (1984); Ostrooumov, Rojas-Purón y Blanco (1987) y Almaguer (1989) quienes, utilizando técnicas modernas de investigación mineralógica, caracterizan los diferentes horizontes de los perfiles de alteración meteórica.

Rojas-Purón (1994), en su tesis de doctorado, expone las principales fases minerales portadoras de níquel en los horizontes lateríticos del yacimiento Moa. Por primera vez se valoran, además, las fases no portadoras. Posteriormente (2001), el mismo autor presenta evidencias a favor de que la goethita es la principal portadora de níquel en los horizontes lateríticos de las cortezas ferroniquelíferas.

Las investigaciones más importantes sobre la temática durante los últimos años (2007-2016) pertenecen a Proenza y otros investigadores (2007 a,b, 2010); Muñoz y Orozco (2009); Muñoz, Rodríguez-Infante y Barea-Pérez (2015); Lavaut (2015) y Roqué-Rosell y demás colaboradores (2008, 2010); Aiglsperger *et al.* (2016).

Rojas-Purón, Simoes y Orozco (2012) caracterizan las principales fases minerales de manganeso portadoras de cobalto, determinando que estas tienden a concentrarse en la fracción  $-0,83 \text{ mm} + 0,74 \text{ mm}$  del material laterítico y señalan la litioforita como fase principal portadora de cobalto. Por otra parte, Roqué-Rosell y otros investigadores (2010) demuestran la sorción del níquel por litioforita en los yacimientos de Moa.

Estudios relacionados con los minerales saprolíticos portadores de Ni en cortezas de intemperismo, como los del yacimiento San Felipe, son escasos (ej. Tauler y colaboradores 2011), por lo que este tema constituye una tarea pendiente, cuyos resultados son requeridos en varios campos, desde el minado hasta la obtención de un producto tecnológico más rico en Ni, sin excluir el análisis de su comportamiento en los procesos geológicos. Este artículo es una modesta contribución a estos propósitos.

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.1. Definición de la zona de estudio**

Los resultados de Chang (2001, 2005) permitieron establecer los sectores noroeste (NW), este (E) y sureste (SE) como los más perspectivas, y un sector centro-oeste (CW) como menos perspectivo. Para la caracterización se seleccionaron dos pozos: uno del sector E más enriquecido y otro del sector CW con los contenidos de níquel más bajos del yacimiento.

### **2.2. Muestreo y caracterización de los perfiles**

Las 20 muestras estudiadas provienen de dos pozos de perforación, representativos del perfil laterítico-saprolítico de San Felipe (Figura 1). Doce de las muestras son del pozo 84 (N80 E 124) del sector E, más enriquecido, donde se muestreó principalmente la saprolita; las ocho restantes fueron tomadas del pozo 83 (N44 E75) del sector CW, poseedor de los contenidos de níquel más bajos del yacimiento, en el que se muestreó todo el perfil.

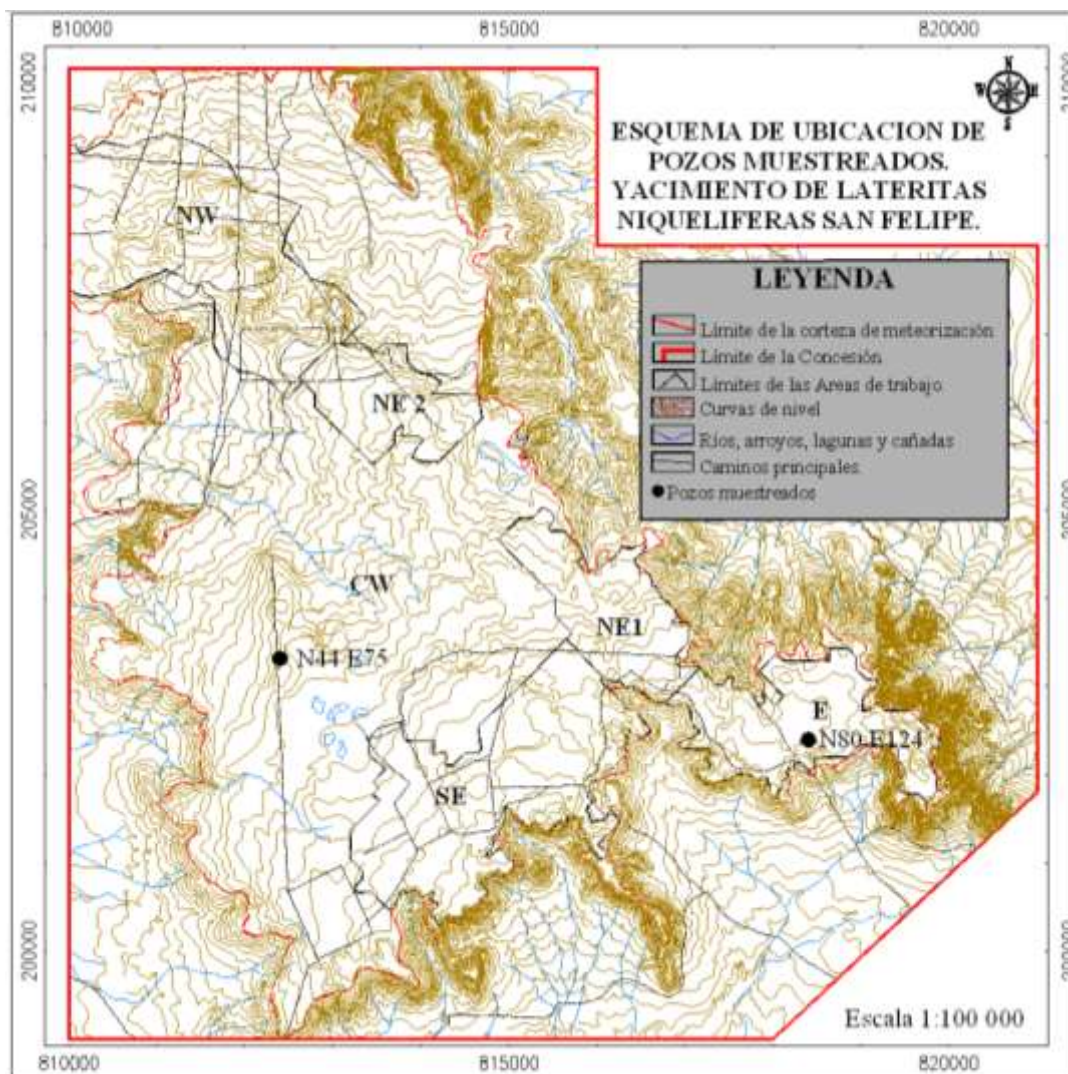


Figura 1. Esquema de ubicación de los pozos muestreados.

La Figura 2 ilustra la ubicación de las muestras en profundidad y el horizonte al que pertenecen (Marín 2011). Se observa que el espesor de los horizontes no se conserva lateralmente y que en el sondeo 84 la saprolita prácticamente aflora en la superficie (topográfica).

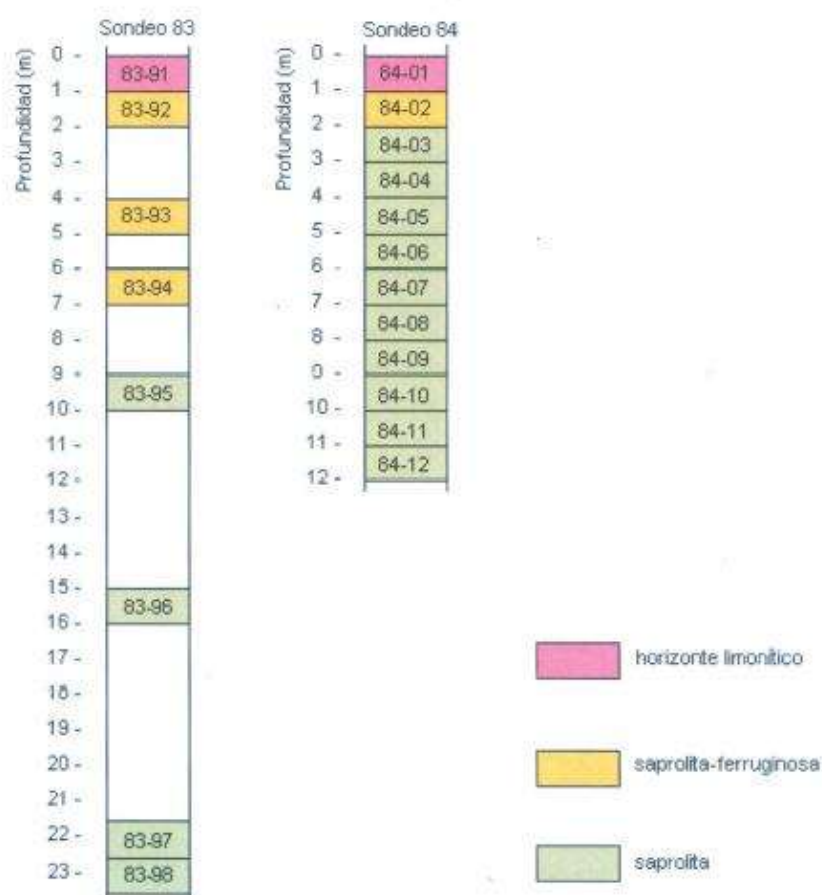


Figura 2. Perfiles esquemáticos de los pozos 83 (N44 E75) y 84 (N80 E124). Relación de muestras y profundidad a la que se han obtenido.

### 2.3. Técnicas analíticas

La caracterización mineralógica del perfil laterítico de San Felipe se ha realizado mediante: difracción de rayos X (DRX), microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido con analizador de energía (SEM-EDS) y microscopía electrónica de transmisión con EDX acoplado (TEM-EDX).

Los datos de DRX se registraron con un difractómetro Panalytical X'Pert PRO MPD con radiación incidente monocromática Cu-K $\alpha$  ( $\lambda=1,5418 \text{ \AA}$ ) a 45 kV y 40 mA. Los espectros de DRX se obtuvieron para ángulos de barrido ( $2\theta$ ) de  $4^\circ$  a  $80^\circ$  sobre muestras en polvo, previamente secadas a  $50^\circ$  en estufa durante 24 horas y trituradas en un mortero de ágata. La longitud de paso fue de  $0,017^\circ$  ( $2\theta$ ) y el tiempo de adquisición de 50,2 s. También se realizó DRX de algunas muestras en forma de agregados orientados tratados con etilenglicol y calentados a  $550^\circ$  (ángulos de barrido  $2\theta$  de  $3^\circ$  a  $25^\circ$ ). Los análisis se hicieron en el Centres Científics i Tecnològics Universitat de Barcelona. La interpretación de los espectros se hizo con el programa X'Pert

HighScore Plus que incorpora la base de datos Power Diffraction File #2 (2000) del International Center for Diffraction Mineral Data.

Las imágenes de microscopía electrónica de barrido (SEM) se tomaron en un microscopio electrónico de barrido ESEM Quanta 200 FEI, XTE 325/D8395 que incorpora un detector de energía dispersiva (EDS) con el que se obtuvieron espectros de energía. El equipo está situado en el Centres Científics i Tecnològics Universitat de Barcelona.

Se hizo un estudio mediante DRX de la morfología de los agregados orientados de esmectita para determinar la fórmula estructural de esta, mientras que la microscopía electrónica de transmisión (TEM-AEM) tuvo el fin de caracterizar el mineral del grupo de las esmectitas que aparece en las muestras (Tauler *et al.* 2011; Chang 2001, 2005, 2013, 2015; Chang & Rojas-Purón 2015).

Los datos se adquirieron con un microscopio electrónico JEOL 2000 FX equipado con un espectrómetro OXFORD ISIS que trabaja a 136 kV (resolución 5,39 kV), sobre una suspensión acuosa muy diluida de la muestra. Los análisis se realizaron en el Centro de Microscopía Electrónica Luis Bru de la Universidad Complutense de Madrid.

### **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **3.1. Composición mineralógica del perfil de intemperismo**

Tauler *et al.* (2011) y Chang (2013) dividen el perfil laterítico en horizonte limonítico y saprolítico, y este a su vez en subzonas.

##### *Horizonte limonítico*

Las muestras de este horizonte, muy poco compactas y de marcado color rojizo, están constituidas mayoritariamente por óxidos y oxi-hidróxidos de hierro (hematites y goethita) y, en menor cantidad, por cuarzo y lizardita.

##### *Saprolita ferruginosa*

En las muestras de la saprolita-ferruginosa, poco compactas y de color marrón, la cantidad de hematita disminuye considerablemente respecto a las del horizonte suprayacente, hasta tal punto que en el espectro de DRX solo se observan indicios de esta. La goethita, sin embargo, sigue siendo una de las fases mayoritarias. Las muestras contienen, además, un mineral del grupo de las esmectitas y cuarzo. Hacia la parte inferior del perfil empieza a aparecer maghemita.

En general, se trata de muestras con abundante porosidad y fracturas. El cuarzo está en las muestras en agregados criptocristalinos, de tamaño superior a 200 µm, deformados y con los bordes redondeados. La esmectita



se presenta formando agregados criptocristalinos irregulares, porosos y con inclusiones de óxidos o hidróxidos de Fe (Figura 3, izquierda). Los cristales de maghemita presentan tamaños superiores a 300  $\mu\text{m}$  y están muy fracturados (Figura 3, derecha).

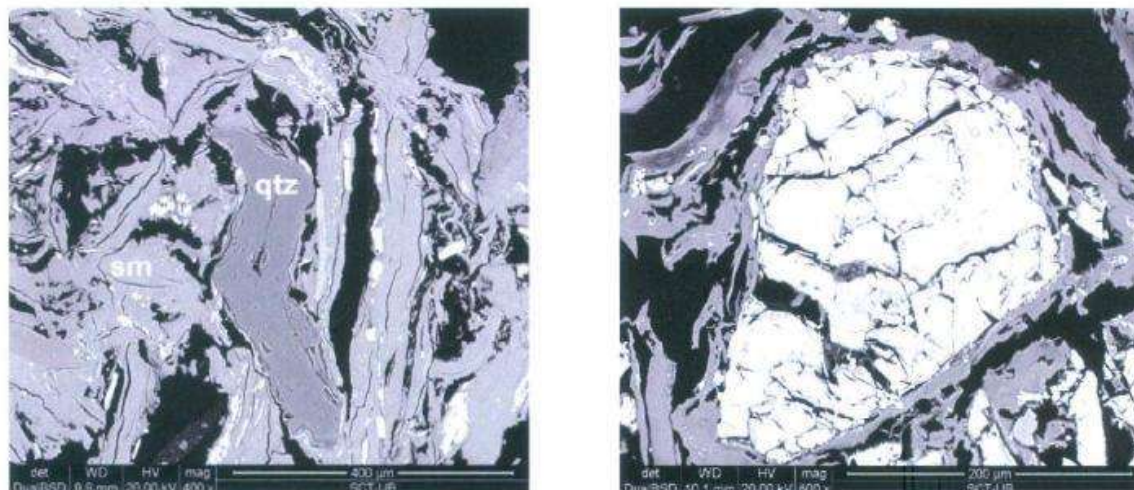


Figura 3. (Izq.) Imagen de electrones retrodispersados (BSE) de agregados criptocristalinos de esmectita, cuarzo y óxidos de hierro. (Der.) Imagen BSE de un cristal de óxido ó hidróxido de hierro.

### *Saprolita*

Las muestras de la saprolita, que presentan tonalidades verdosas, están constituidas por maghemita, lizardita y esmectita. Teniendo en cuenta las proporciones de dichos minerales en las muestras se han establecido tres subhorizontes: saprolita superior, saprolita media y saprolita inferior.

### *Saprolita superior*

La saprolita superior tiene una potencia estimada de tres metros. Las muestras de este subhorizonte están caracterizadas por contener mucha esmectita y muy poca lizardita (Figura 4).

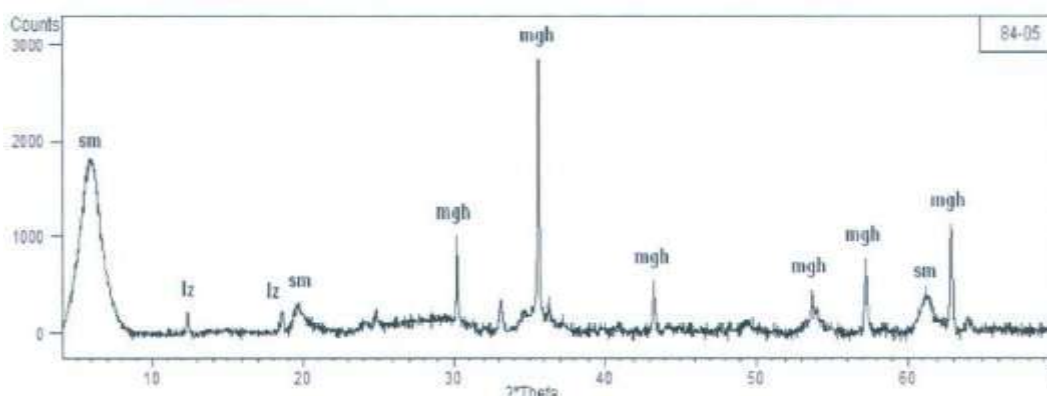


Figura 4. Espectro de DRX de la muestra 84-05. sm: esmectita, lz: lizardita, mgh: maghemita.



En las muestras con abundante porosidad se observa una matriz, formada por óxidos e hidróxidos en los que se aprecian algunos nódulos de minerales opacos y se distinguen cristales de lizardita (de aproximadamente 200  $\mu\text{m}$  de largo), los cuales están siendo reemplazados por esmectita, sobre todo en los bordes.

### *Saprolita media*

La saprolita media es un subhorizonte ligeramente más potente que la saprolita superior (potencia estimada de 4 m). La lizardita aparece en cantidades más elevadas que en la saprolita superior y la cantidad de esmectita ha disminuido.

En las muestras, la lizardita se presenta en cristales superiores a 400  $\mu\text{m}$ , reemplazando a cristales de piroxeno (enstatita) y olivino y con indicios de alteración parcial a esmectita, que forma agregados escamosos (Figura 5). Las imágenes de SEM han permitido caracterizar, además, algunos minerales minoritarios como las espinelas (ricas en Al, Cr y Mg), que presentan cristales idiomórficos de dimensiones superiores a 1 mm, muy fracturados. Las fracturas están rellenas de óxidos de Fe y esmectitas (Figura 6).

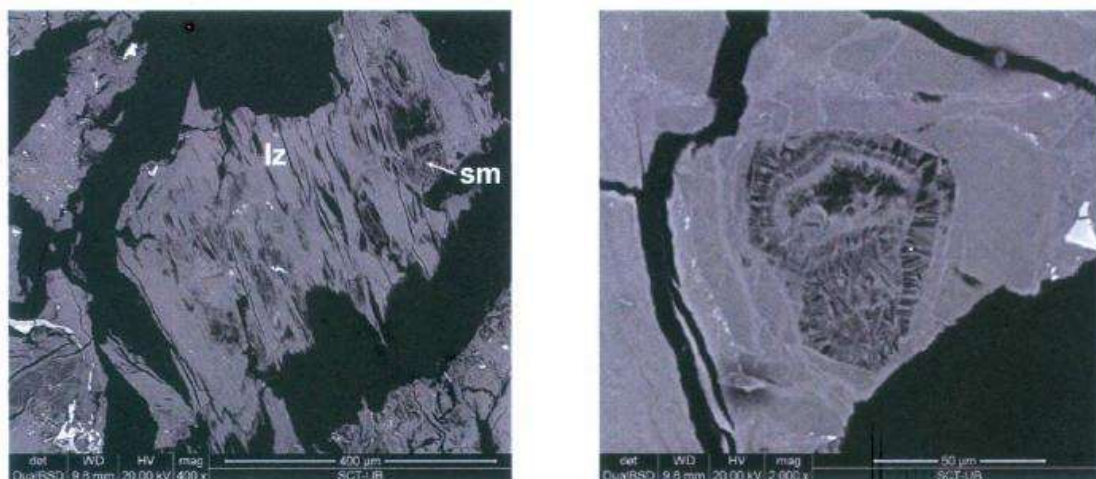


Figura 5. (Izq.) Imagen BSE de un cristal de piroxeno pseudomorfizado por lizardita y alterado parcialmente a esmectita. (Der.) Imagen BSE de un cristal de olivino completamente alterado a lizardita en los bordes y a esmectita en el núcleo.

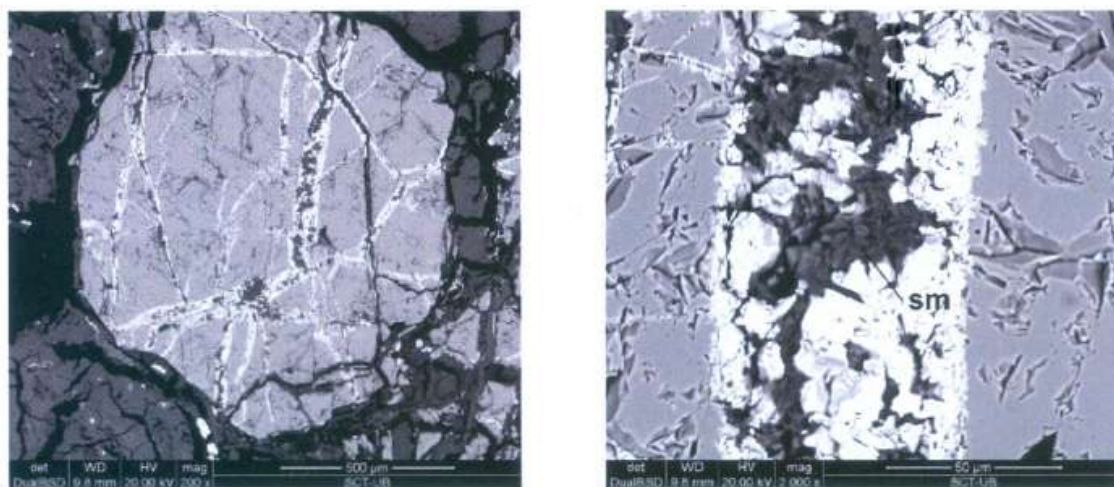


Figura 6. (Izq.) Imagen BSE de cristal de espinela fracturado. (Der.) Detalle de las fracturas, rellenas por esmectita y óxidos de hierro.

### *Saprolita inferior*

La saprolita inferior tiene una potencia superior a 3 m. Las muestras de este subhorizonte se caracterizan por contener lizardita y muy poca esmectita.

En las muestras, los cristales de piroxeno están completamente reemplazados por lizardita. Se observa, además, una película de un mineral criptocristalino de color rojizo (probablemente goethita) en los planos de exfoliación de los piroxenos. Igualmente, los granos de olivino están completamente reemplazados por minerales del grupo de la serpentina (lizardita). La alteración se inicia en los bordes y en las fracturas de los cristales, en las que precipitan óxidos e hidróxidos de Fe. En los núcleos de olivino aparecen también agregados criptocristalinos de esmectita. En algunas muestras también se observan fracturas de hasta 0,2 mm de abertura, completamente rellenas de lizardita.

En general, en la saprolita se observa una disminución de la cantidad de esmectita con la profundidad y un incremento de lizardita.

Algunas muestras de este horizonte presentan una composición ligeramente diferente, con acumulaciones de fragmentos de 1 mm x 0,2 mm, aproximadamente, de sílice secundaria que ha precipitado en forma de agregados botroidales. La morfología de los agregados de cuarzo puede sugerir que se trata de fragmentos que provienen de una vena silicificada que ha colapsado por el confinamiento.

En algunas muestras de la saprolita se ha identificado un mineral del grupo de la clorita (Figura 7). En estas muestras los granos de clorita, de aproximadamente 100 µm de largo, están rodeados de agregados

crisptocristalinos de esmectita, que a su vez contiene inclusiones de óxidos e hidróxidos de Fe.

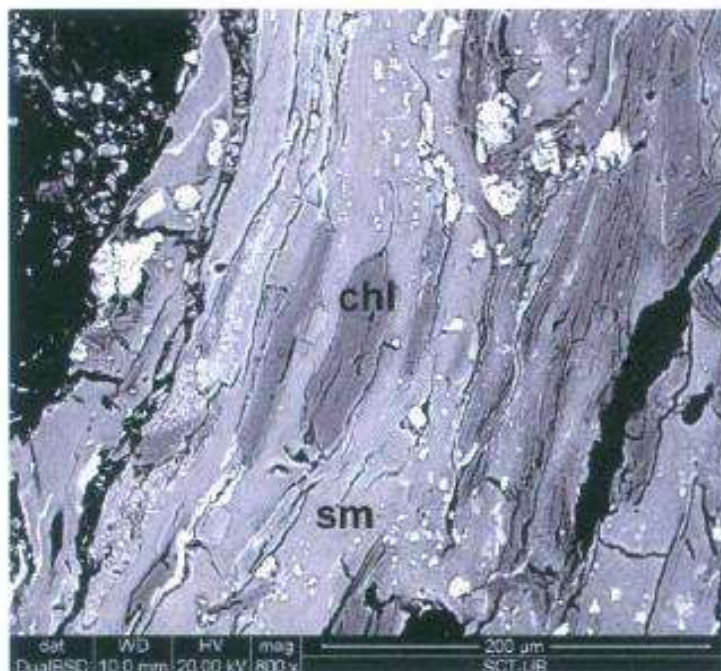


Figura 7. Imagen BSE de cristales de clorita rodeados por agregados crisptocristalinos de esmectita.

### 3.2. Cristaloquímica de la principal especie mineralógica portadora de níquel

Se ha efectuado un estudio mediante DRX de agregados orientados y microscopía electrónica de transmisión (TEM-AEM) para caracterizar el mineral del grupo de las esmectitas que aparece en las muestras (Tauler *et al.* 2011; Chang 2015).

En el método de agregados orientados se requiere una preparación especial de la muestra -en forma de cristales orientados- que provoca que sólo difracten las reflexiones 001. Cada grupo de filosilicatos responde de una manera característica a los distintos tratamientos (saturación de la muestra en etilenglicol y secado a 550°C), hecho que permite caracterizarlos (Moore y Reynolds 1997).

El espectro de DRX confirmó que se trata de una esmectita ya que el pico que corresponde al plano reticular 001 (14,7 Å en agregados orientados) se traslada a 17,3 Å en el tratamiento de la muestra saturada con etilenglicol y a 9,9 Å en la muestra secada a 550 °C, por la ganancia y pérdida, respectivamente, de moléculas de agua en la estructura (Figura 8a).

De acuerdo con el valor del espaciado reticular (060 y 330), determinado a partir de los espectros DRX de muestras en forma de polvo (Figura 8b), las

esnectitas de San Felipe pueden considerarse como dioctaédricas. El valor de 1,51 Å coincide con el valor propuesto por Gaudin *et al.* (2004, 2005) en las esnectitas del perfil laterítico de Murrin Murrin (Australia). Se establece que valores superiores a 1,52 Å de espaciado reticular son propios de esnectitas trioctaédricas.

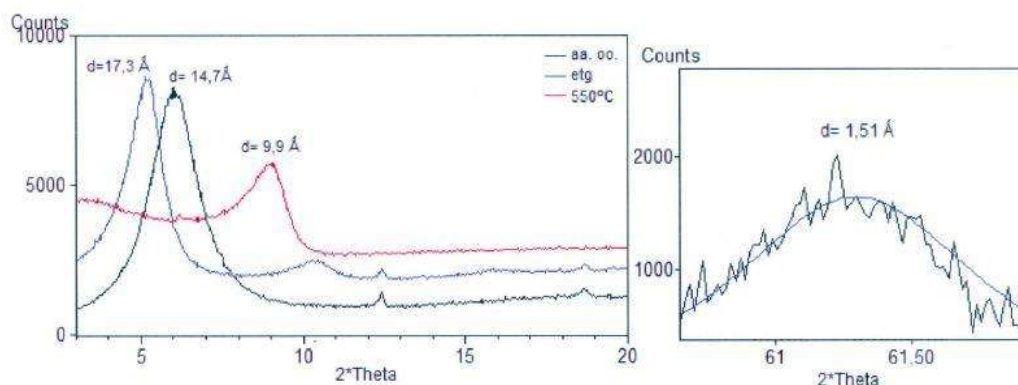
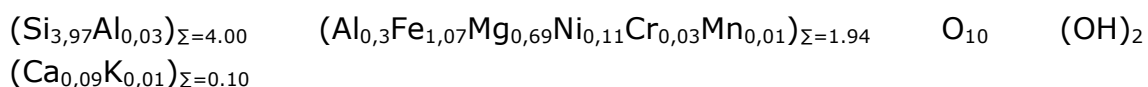


Figura 8. (Izq.) Espectro DRX con el valor de espaciado reticular de las reflexiones 001 de la muestra 84-05 en agregados orientados, y tratamientos de etilenglicol y a 550 °C y (der.) valor del espaciado reticular de las reflexiones 060 y 330 mediante el programa X'pert (background extraído).

La microscopía electrónica de transmisión (TEM-AEM) permitió obtener la fórmula estructural de la esnectita, confirmando que se trata de una esnectita férrica-magnésica con níquel (nontronita).

La fórmula teórica de la nontronita es  $\text{Na}_{0,3} \text{Fe}_2^{+++} (\text{Si}, \text{Al})_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2 \cdot n(\text{H}_2\text{O})$

Los resultados de los análisis realizados a la muestra 84-05 se muestran en la Tabla 1 y la fórmula estructural de la celda unidad obtenida, con los valores promedio es:



Los átomos de Fe oscilan entre 0,95 y 1,29 en las fórmulas estructurales, el Mg oscila entre 0,49 y 1,01 y el Ni entre 0 y 0,17 átomos por fórmula estructural.

Tabla 1. Resultados de análisis TEM AEM de muestras de esmectitas en saprolitas de San Felipe (en %)

Muestra	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NiO	TOTAL
Sm 05 3	7,39	4,00	61,96	0,12	1,41	0,01	0,01	22,83	2,29	100,02
Sm 05 4	7,34	6,55	61,53	0,33	1,99	0,44	0,17	19,66	1,98	99,99
Sm 05 5	10,08	3,27	62,86	0,19	0,77	0,22	0,06	19,72	2,83	100
Sm 05 6	10,23	1,88	56,56	0,13	0,62	0,29	0,15	28,21	1,93	100
Sm 05 7	5,03	4,98	61,94	0,17	0,75	1,33	0,01	22,55	3,24	100
Sm 05 8	5,07	5,25	61,96	0,18	0,49	1,17	0,13	22,46	3,29	100
Sm 05 9	5,54	5,46	63,08	0,17	0,52	1,03	0,11	21,17	2,91	99,99
Sm 05 11	5,10	4,35	62,52	0,13	0,45	0,57	0,01	24,08	2,8	100,01
Sm 05 12	6,2	4,66	62,66	0,18	0,98	1,04	0,01	21,23	3,04	100
Sm 05 13	8,97	3,02	62,67	0,17	0,92	0,27	0,85	20,34	2,78	99,99
Sm 05 14	6,78	3,21	62,35	0,2	1,01	0,28	0,01	24,85	1,32	100,01

El cálculo de las fórmulas cristaloquímicas de la celda unidad (Tabla 2) permite valorar desde el punto de vista geoquímico la participación individual (en cada muestra) de los contenidos específicos del número de átomos de níquel y de otros metales que forman parte de la composición química de la molécula de la nontronita, así como, es posible estimar el papel de portador primario del níquel a las cortezas de intemperismo, mediante los procesos de meteorización de las litologías ultramáficas.

Tabla 2. Número de cationes en la celda cristalográfica unidad de las nontronitas del yacimiento San Felipe. Calculado sobre la base de 11 átomos de los análisis TEM-AEM

Muestra	Mg	Al	Si	K	Ca	Cr	Mn	Fe	Ni
<b>Sm05 3</b>	0,71	0,30	3,98	0,01	0,1	0,001	0,001	1,10	0,12
<b>Sm05 4</b>	0,70	0,49	3,93	0,03	0,14	0,02	0,01	0,94	0,10
<b>Sm05 5</b>	0,96	0,25	4,01	0,02	0,05	0,01	0,003	0,95	0,4
<b>Sm05 6</b>	1,00	0,15	3,74	0,01	0,04	0,02	0,01	1,4	0,10
<b>Sm05 7</b>	0,48	0,38	3,99	0,01	0,05	0,07	0,001	1,09	0,17
<b>Sm05 8</b>	0,49	0,40	4,00	0,01	0,03	0,06	0,007	1,09	0,17
<b>Sm05 9</b>	0,53	0,41	4,03	0,01	0,04	0,05	0,006	1,02	0,15
<b>Sm05 11</b>	0,49	0,33	4,02	0,01	0,03	0,03	0,001	1,17	0,14
<b>Sm05 12</b>	0,59	0,35	4,02	0,01	0,07	0,05	0,001	1,02	0,16
<b>Sm05 13</b>	0,86	0,23	4,02	0,01	0,06	0,01	0,04	0,98	0,14
<b>Sm05 14</b>	0,65	0,24	4,00	0,02	0,07	0,01	0,001	1,20	0,07

Del análisis de la Tabla 2, donde se exponen los números de cationes de las muestras de nontronitas investigadas, así como de las fórmulas



cristaloquímicas expuestas, se destacan los valores de los números de cationes de  $\text{Fe}^{3+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , con valores muy próximos entre ellos; en cambio, los cationes  $\text{Cr}^{3+}$  y  $\text{Mn}^{2+}$  manifiestan valores muy por debajo de la unidad.

Estas relaciones tienen un extraordinario significado geoquímico, al indicarnos que la mineralización nontronítica férrica es rica en magnesio y se corresponde con las características genéticas de menas niquelíferas asociadas a cortezas de intemperismo.

El cálculo y elaboración de las fórmulas cristaloquímicas para las nontronitas ha permitido incrementar la precisión y confiabilidad de los resultados analíticos de los elementos químicos que integran las menas arcillosas silicatadas. Estos resultados pueden ser utilizados para medir el grado de eficiencia industrial en la futura planta de beneficio de San Felipe.

El análisis de la composición química de la celda elemental de las nontronitas en las menas del yacimiento San Felipe ha permitido corroborar el comportamiento geoquímico de los elementos químicos que integran las mismas.

La composición química de las esmectitas de San Felipe se ha representado en un diagrama triangular  $\text{Al}/(\text{Mg}+\text{Ni})/(\text{Fe}+\text{Cr})$  junto con las de Murrin Murrin (Gaudin *et al.* 2004, Gaudin *et al.* 2005). Se observa que las esmectitas de San Felipe contienen cantidades más elevadas de níquel y magnesio (Figura 9).

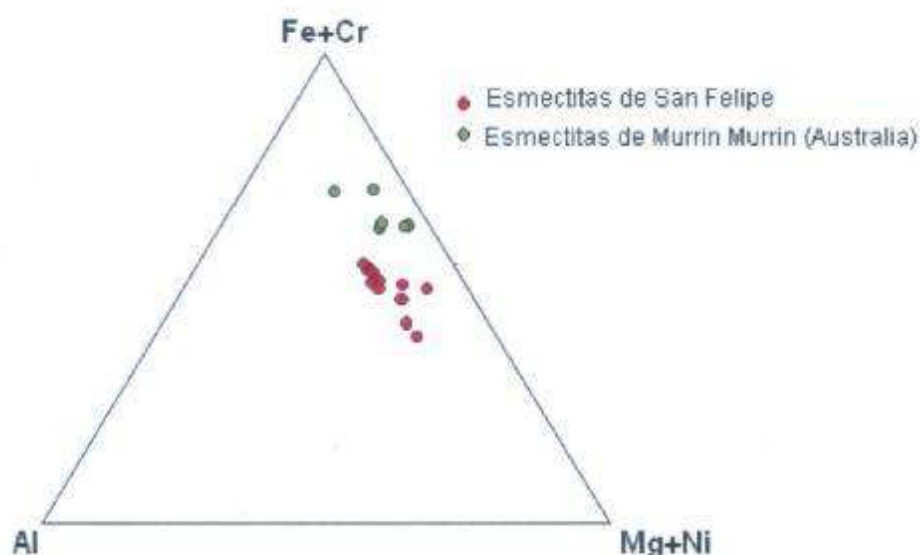


Figura 9. Diagrama ternario  $\text{Al}/(\text{Mg}+\text{Ni})/(\text{Fe}+\text{Cr})$  con los datos de TEM-AEM de las esmectitas de San Felipe y de Murrin Murrin.

Mediante TEM se han obtenido también imágenes de la morfología de los agregados de nontronita en la muestra estudiada, que parecen ser ligeramente laminares. Los cristales tienen tamaños cercanos a 200 nm (Figura 10).

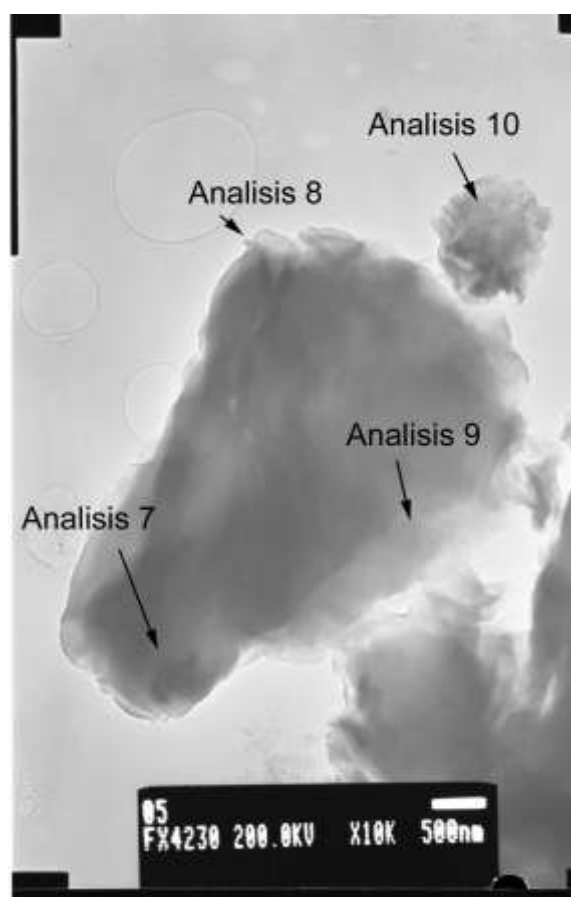


Figura 10. Imagen de TEM de agregados de esmectita. Se marca la posición de cuatro análisis.

#### 4. CONCLUSIONES

- La identificación y caracterización de los minerales portadores de Ni permite orientar con mayor precisión el procesamiento tecnológico, logrando que se obtengan mejores rendimientos en la recuperación del metal.
- La saprolita está constituida básicamente por nontronita, lizardita y maghemita.
- Los resultados de química mineral indican que la fase principal portadora de Ni en el horizonte saprolítico de San Felipe es la nontronita, representando alrededor del 65 % en peso de las menas del horizonte.



## 5. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido parcialmente financiada por los proyectos CGL2009-10924 y CGL 2012-36263, así como por los proyectos 2009-SGR-444 y 2014-SGR-1661 de la *Generalitat de Catalunya*.

## 6. REFERENCIAS

- AIGLSPERGER, T.; PROENZA, J. A.; LEWIS, J. F.; LABRADOR, M.; SVOJTKA, M.; ROJAS-PURÓN, A.; LONGO, F. & ĎURIŠOVÁ, J. 2016: Critical metals (REE, Sc, PGE) in Ni-laterites from Cuba and the Dominican Republic. *Ore Geology Reviews* 73: 127-147.
- ALMAGUER, A. 1989: *Mineralogía y geoquímica de las cortezas de intemperismo de las rocas ultramáficas de la provincia de Holguín*. Tesis doctoral. C.I.C.T. de la A. C. de Cuba.
- BRAND, N. W.; BUTT, C. R. M. & ELÍAS, M. 1998: Nickel laterites: Classification and features. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics* 17: 81-88.
- BRINDLEY, G. W. 1978: The structure and chemistry of hydrous nickel containing silicate and aluminate minerals. *Bulletin du B. R. G. M. Section II* 3: 233-245.
- CHANG, A. 2001: Reports on distribution of chemical elements, geological controls, tectonics and morphology of San Felipe Plateau. San Felipe Mining Limited (Inédito). 47 p.
- CHANG, A. 2005: Características geólogo-geoquímicas y mineralógicas del yacimiento de lateritas niquelíferas San Felipe, Camagüey, Cuba. 1ra Convención Cubana de Ciencias de la Tierra (Geociencias 2005). 1er Congreso de Minería. Memorias. La Habana, Cuba, 5-8 abril, 587-601. ISBN 978-959-7117-03-7.
- CHANG, A. 2013: Esmeclitas nontroníticas portadoras de la mineralización niquelífera del yacimiento laterítico-saprolítico San Felipe. V Convención Cubana de Ciencias de la Tierra. La Habana, Cuba, 1-5 abril. ISSN 2307-499X.
- CHANG, A. 2015: Identificación y caracterización cristaloquímica de la principal especie mineralógica portadora de níquel del yacimiento saprolítico San Felipe. VI Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, 4-8 mayo, La Habana, Cuba. ISSN 2307-499X.
- CHANG, A. & ROJAS-PURÓN, A. L. 2015: Fases minerales portadoras de níquel presentes en el horizonte saprolítico del yacimiento San Felipe. *Minería & Geología* 31(4): 1-18.
- CORDEIRO, C.; COLLAZO, J. & VOSKRESENSKAYA, N. 1977: Solubilidad del níquel asociado con diferentes minerales. *Minería en Cuba* 3(1): 1-13.

- CORDEIRO, C. 1981: *Análisis químico de fases en menas lateríticas oxidadas de la corteza de intemperismo de Cuba*. Tesis doctoral. Universidad de La Habana. 173 p.
- ELÍAS, M.; DONALDSON, M. J. & GIORGETTA, N. 1981: Geology, Mineralogy and Chemistry of Lateritic Ni-Co deposits near Kalgoorlie, Western, Australia. *Economic Geology* 76(6): 1 775-1 783.
- ELÍAS, M. 2002: Nickel laterite deposits -a geological overview, resources and exploitation. *Giant ore deposits: Characteristics, genesis and exploration. CODES Special Publication* 4: 205-220.
- FREYSSINET, PH.; BUTT, C. R. M. & MORRIS, R. C. 2005: Ore-forming processes related to lateritic weathering. *Economic Geology 100<sup>th</sup> Anniversary Volume*: 681-722.
- GAUDIN, A.; GRAUBY, O.; NOACK, Y.; DECARREAU, A. & PETIT, S. 2004: Accurate crystal chemistry of ferric smectites from the lateritic nickel ore of Murrin Murrin (Western Australia). I. XRD and multi-scale chemical approaches. *Clay Minerals* 39(3): 301-315.
- GAUDIN, A.; DECARREAU, A.; NOACK, Y. & GRAUBY, S. 2005: Clay mineralogy of the nickel laterite ore developed from serpentinized peridotites at Murrin Murrin, Western Australia. *Australian Journal of Earth Sciences* 52(2): 231-241.
- GALLARDO, T.; CHANG, A.; TAULER, E. & PROENZA, J. 2010: El yacimiento de San Felipe (Camagüey, Cuba): un ejemplo de lateritas níquelíferas tipo arcilla. *Macla* 13 (septiembre): 87-88.
- GLEESON, S. A.; BUTT, C. R. M. & ELIAS, M. 2003: Nickel laterites: a review. *Society of Economic Geologists (SEG) Newsletter* 54: 9-16.
- KUDELASEK, V.; ZAMARSKY, V. & MARXOVA, I. 1967: La mineralogía de la corteza de intemperismo de las rocas ultrabásicas de la costa norte de la provincia de Oriente, Nicaro, Moa. *Revista de Geología* 1(1): 50-76.
- LAVAUT, W. 2015: Las bajas concentraciones metalíferas: Reto de la actividad minero-metalúrgica cubana. VI Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, 4-8 mayo, La Habana, Cuba. ISSN 2307-499X.
- LEWIS, J. F.; DRAPER, G.; FERNÁNDEZ, J. A. P.; ESPAILLAT, J. & JIMÉNEZ, J. 2006: Ophiolite-Related Ultramafic Rocks (Serpentinities) in the Caribbean Region: A Review of their Occurrence, Composition, Origin, Emplacement and Ni-Laterite Soil Formation. *Geologica Acta* 4(1-2): 237-263.
- LINCHENAT, A. & SHIROKOVA, I. 1964: Individual characteristics of the nickeliferous iron (laterite) deposits of the northeastern part of Cuba (Pinares de Mayari, Nicaro and Moa). 24th International Geological Congress, Montreal, pt. 14, sec. 14, pp. 172-187.
- MARÍN, P. 2011: *Caracterización del perfil laterítico rico en níquel de San Felipe (Cuba) y separación de fases minerales mediante caída de*

- partículas en un fluido viscoso*. Tesis de grado. Universidad de Barcelona. 61 p.
- MOORE, D. & REYNOLDS, R. C. 1997: X-Ray Diffraction and the Identification of Clay Minerals. Oxford University Press.
- MUÑOZ, J. N. & OROZCO, G. 2009: Mineralogía y orden cronológico de formación de los minerales de las menas lateríticas: implicaciones en la exploración de explotación. III Convención Cubana de Ciencias de la Tierra. Memorias en CD ROM. La Habana, 16-20 de marzo. ISBN 978-959-7117-19-3.
- MUÑOZ, J. N.; RODRÍGUEZ-INFANTE, A. & BAREA-PÉREZ, I. 2015. Variabilidad de los perfiles lateríticos en los yacimientos ferroniquelíferos de Moa. *Minería & Geología* 31(2): 21-33.
- OSTROUMOV, M.; ROJAS-PURÓN, A. L. & BLANCO, J. 1987. Caracterización mineralógica de las lateritas del sector Atlántico, Mina Moa. *Minería y Geología* 5(1): 3-20.
- PONCE, N. & CARRILLO, D. 1984. Mineralogía y composición sustancial de las menas ferroniquelíferas del yacimiento de corteza de intemperismo La Delta. *Serie Geológica* 1: 3-16.
- POWDER DIFFRACTION FILE, version 2. Joint Committee of Powder Diffraction Standards. 2000: International Center for Diffraction Data, 12 Campus Blvd., Newton Square, Pennsylvania 19073-3273, USA.
- PROENZA, J. A.; TAULER, E.; MELGAREJO, J. C.; GALÍ, S.; LABRADO, M.; MARRERO, N.; PÉREZ-MELO, N.; ROJAS-PURÓN, A. L. & BLANCO-MORENO, J. A. 2007a. Nuevos datos sobre los minerales portadores de Ni y Co en los perfiles lateríticos de Cuba Oriental. Geociencias (II). Memorias en CD ROM. La Habana, 20-23 marzo, p. 1-9. ISBN 978-959-7117-16-2.
- PROENZA, J. A.; TAULER, E.; MELGAREJO, J. C.; GALÍ, S.; LABRADO, M.; MARRERO, N.; PÉREZ-MELO, N.; ROJAS-PURÓN, A. L. & BLANCO-MORENO, J. A. 2007b: Mineralogy of oxide and hydrous silicate Ni-laterite profiles in Moa Bay area, northeast Cuba. *Diggin' Deeper. Dublin (Ireland), Irish Association for Economic Geology* 2: 1 389-1 392.
- PROENZA, J. A.; ROQUE, J.; LABRADOR, M.; GALÍ, S.; TAULER, E.; GALLARDO, T.; LEWIS, J. F. & LONGO, F. 2010: Mineralogical composition and mineral chemistry of supergene cobalt ores from eastern Cuba and Dominican Republic Ni-laterite deposits. In: 20th General Meeting of the International Mineralogical Association. Budapest, Hungary, 21-27 August.
- PROENZA, J. A. 2015: Mineralogía y Geoquímica de Ni, Co, EGP, Sc, REE en yacimientos lateríticos. *Macla* 20: 1-7.
- ROJAS-PURÓN, A. 1994: *Principales fases minerales portadoras de Ni en los horizontes lateríticos del yacimiento Moa*. Tesis doctoral. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 94 p.

- ROJAS-PURÓN, A. 2001: Evidencias a favor de que la goethita es la principal portadora de níquel en los horizontes lateríticos de las cortezas ferroniquelíferas. *Minería y Geología* 18(3-4): 21-31.
- ROJAS-PURÓN, A.; SIMOES, R. & OROZCO, G. 2012: Identificación mineralógica de los óxidos de manganeso del yacimiento laterítico Punta Gorda, Moa, Cuba. *Minería y Geología* 28(1): 1-26.
- ROQUÉ-ROSELL, J.; PROENZA, J. A.; MOSSELMANS, F.; ATKINSON, K.; QUINN, P.; LABRADOR, M. & GALÍ, S. 2008: Preliminary studies on Ni in laterite deposits from Moa Bay (Cuba) by means  $\mu$ XRF and  $\mu$ XAS using Synchrotron Radiation. *Macra* 9: 219-220.
- ROQUÉ-ROSELL, J.; MOSSELMANS, F.; PROENZA, J. A.; LABRADOR, M.; GALÍ, S.; ATKINSON, K. D. & QUINN, P. D. 2010: Sorption of Ni by "lithiophorite-asbolane" intermediates in Moa Bay lateritic deposits, eastern Cuba. *Chem. Geol.* 275(1): 9-18.
- SHIROKOVA, I. Y. 1967: Intemperismo de las rocas ultrabásicas del Norte de Oriente: Yacimientos de Pinares de Mayarí, Moa y Nicaro: Génesis y composición de las menas. Inédito. Fondo Geológico Nacional. 73 p.
- STRNAD, J. 1968: Desarrollo del conocimiento geológico y del aprovechamiento de las menas residuales niquelíferas. *Revista Tecnológica* 6(1-2): 3-32.
- TAULER, E. 2009: Ni-sepiolite-falcondite in garnierite mineralization from the Falcondo Ni-laterite deposit, Dominican Republic. *Clay Minerals* 44(4): 435-454.
- TAULER, E.; GALLARDO, T.; GARCÍA, E.; PROENZA, J.; SUARES, M. & CHANG, A. 2011: Caracterización mineralógica de las esmectitas niquelíferas del yacimiento de San Felipe (Camagüey, Cuba). *Macra* 15: 89-90.
- VILLANOVA-DE BENAVENT, C.; PROENZA, J. A.; GALÍ, S.; GARCÍA-CASCO, A.; TAULER, E.; LEWIS, J. F.; LONGO, F. 2014: Garnierites and garnierites: textures, mineralogy and geochemistry of garnierites in the Falcondo Ni-laterite deposit, Dominican Republic. *Ore Geology Reviews* 58: 91-109.
- VOSKRESENSKAYA, N. T. 1983: Características mineralógicas y geoquímicas de los minerales del grupo de la serpentina de algunos yacimientos niquelíferos de Cuba. En: Bol. Corteza de intemperismo, No. 18. Nauka, Moscú.
- VOSKRESENSKAYA, N. T. 1987: Formas de presentarse el Ni en los minerales portadores de las menas silicatadas-oxidadas de Cuba. *Revista Geoquímica* 2 (en ruso), p. 71.
- ZEISSINK, H. E. 1969: The mineralogy and geochemistry of a nickeliferous laterite profile (Greenvale, Queensland, Australia). *Mineralium Deposita* 4(2): 132-152.

**Alfonso Chang-Rodríguez**, [alfonsochr@geocmg.minem.cu](mailto:alfonsochr@geocmg.minem.cu)  
Ingeniero Geólogo Máster en Ciencias. Empresa Geominera  
Camagüey.

**Esperanza Tauler-Ferre.**  
Doctora en Ciencias. Profesora Universidad de Barcelona  
España

**Joaquín A. Proenza-Fernández.**  
Doctor en Ciencias Geológicas.  
Profesor Universidad de Barcelona  
España

**Arturo L. Rojas-Purón**, [arojaspurnh@gmail.com](mailto:arojaspurnh@gmail.com)  
Doctor en Ciencias Geológicas. Profesor Auxiliar. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa  
Holguín, Cuba